

논문 2004-41SP-1-3

## 실사영상 재현을 위한 분광분포 기반의 광선추적기법

### (Ray Tracing Method Based on Spectral Distribution for Reproducing a Realistic Image)

이명영\*, 이철희\*\*\*, 이호근\*, 하영호\*\*

(Myong-Young Lee, Cheol-Hee Lee, Ho-Keun Lee, and Yeong-Ho Ha)

#### 요약

본 논문에서는 관찰자의 시야에 들어오는 3차원 영상을 정확하게 재현하기 위한 분광분포 기반의 영상재현알고리즘을 제안한다. 빛의 투과 및 굴절을 모델링하기 위해 컴퓨터 그래픽에서 많이 사용되고 있는 광선추적기법을 이용하고, 정확한 실사영상(realistic image)을 재현하기 위하여 물체의 물리적 특성을 반영하는 분광분포를 고려하였다. 광원에서 출발한 빛을 추적하여 더욱 정확한 실사영상을 재현하기 위해 음영모델을 두 가지의 측면에서 개선하여 적용하였다. 첫째는, 빛이 투과할 때에 발생하는 에너지의 감소를 Bouguer-Beer의 법칙을 적용하여 고려하였다. 둘째는, 일반적인 상수로 정의하던 주변광의 요소를 주위 물체들의 반사광을 고려한 새로운 주변광으로 개선하여 적용하였다. 제안한 기법을 이용한 시뮬레이션을 통하여 실사영상에 근접한 3차원 영상을 재현할 수 있었다.

#### Abstract

In this paper, we propose an improved reproduction algorithm for a realistic image of the real scene based on the spectral distribution of lights and objects. The proposed method for the realistic image is focused on a more accurate reproduction of an image incident on the sight of the viewer. At first, to reproduce an image accurately incident on a sight of viewer, we used the backward ray tracing method based on spectral distribution of object and illuminant representing its physical characteristic used in real. Next, we propose utilizing the improved shading model of the reproduction algorithm of realistic image by applying Bouguer-Beer's law to consider an optical absorptive property of transparent objects. We also define a new ambient light term which is considered the diffuse reflection of neighboring objects instead of constant ambient light. The simulation results show that the proposed algorithm can reproduce the visually similar image with a scene incident on a sight of viewer.

**Keywords:** 실사영상, 광선추적기법, 분광분포, 음영모델, Bouguer-Beer's law

#### I. 서론

컴퓨터 그래픽은 컴퓨터의 가장 넓은 응용분야 중의 하나로써 문서에 의한 정보보다 시각화된 정보가 가져다주는 효과가 훨씬 크기 때문에 그 활용분야가 점점

\* 학생회원 \*\* 정회원, 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부  
(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National Univ.)

\*\*\* 정회원, 안동대학교 컴퓨터공학과  
(Department of Computer Engineering, Andong Univ.)

※ 본 연구는 과학기술부 NRL 사업(M10203000102-03J0000-04810) 지원에 의해서 수행되었습니다.

접수일자 : 2003년9월5일, 수정완료일 : 2003년12월26일

더 확대되고 있고, CAD/CAM, 애니메이션, 그리고 과학적 영상화(scientific visualization)에 이르기까지 훨씬 복잡한 기술과 알고리즘이 요구되고 있다. 3차원 그래픽이란 일반적으로 우리가 살고 있는 실세계를 컴퓨터 내에서 처리하는 제반과정이라 할 수 있는데, 때로는 3차원 물체의 단순한 디스플레이나 간단한 렌더링을 2.5차원으로, 물체의 제반 성질(property)까지 고려한 렌더링을 3차원으로 나누는 경우도 있다.

3차원 영상을 컴퓨터로 처리하여 디스플레이 하려는 표현기술인 렌더링은 장면을 영상으로 전환하는 과정으로서, 3차원 공간상에서 눈으로 볼 수 있는 현실감

(realistic)있는 장면을 2차원 영상으로 생성하는 기법을 말한다. 일반적인 렌더링 기법은 먼저 어떤 물체를 직선과 곡선의 집합체로 표현한 다음 투영을 통해 테두리를 표시하여 대상물의 형태만을 그려주는 와이어 프레임(wire-frame) 렌더링과 각 픽셀의 색을 결정하기 위해 어떤 물체를 그것을 둘러싸고 있는 면으로 나타낸 다음 국부조명모델(local illumination model)을 이용하여 영상의 현실감을 살리는 질감구성의 과정의 두 단계로 나뉜다. 또한 여기에, 은선과 은면제거 알고리즘이나 음영모델(shading model)을 추가하여 보다 현실감 있게 3차원 영상을 표현한다.

이러한 3차원 컴퓨터 그래픽스 기술의 발달로 가상 환경(virtual environment)을 이용한 간접체험과 시제품의 개발에 앞선 가상의 모델링 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 시각조건에 맞는 가상 환경의 3차원 형상 모델링과 빛의 방향이나 세기 등을 고려한 사실감 있는 질감구성의 두 가지 단계로 나누어질 수 있는데, 질감 구성을 위한 렌더링의 방법에는 크게 영상 기반 방법(image-based method)과 물리 기반 방법(physical-based method)으로 구별된다<sup>[1,2]</sup>. 영상기반 방법은 구성하기 용이하나 많은 데이터량과 정확한 사실성을 반영하지 못하는 단점이 있다<sup>[3]</sup>. 이에 비해 물리 기반 방법은 광원과 물체, 또는 물체와 물체 사이에서 일어나는 빛의 전송을 기하학적으로 모델링함으로써 사실감 있는 영상의 생성에 많이 이용되어 왔다.

이러한 물리 기반 방법에 기초하여 빛의 투과 및 굴절을 모델링하기 위해 컴퓨터 그래픽에서 많이 사용되고 있는 기술이 광선추적기법(ray tracing)이다<sup>[4]</sup>. 광선추적기법은 일정한 스크린을 통해 관찰자의 눈에 들어오는 모든 빛을 찾아내고, 여러 방향에서 들어오는 광선들의 색을 추정하여 영상을 생성하는 기법이다. 광선추적기법은 빛의 경로를 추적한다는 점에서 거울이나 투명한 물체 등을 더욱 현실감 있게 표현할 수 있는 강력한 렌더링 기법이다. 본 논문에서는 이러한 광선추적기법을 사용하여 실사영상(realistic image)을 재현하는 개선된 알고리즘을 제안한다. 관찰자의 시야에 들어오는 영상과 유사한 실사영상을 재현하기 위해서 실제 사용된 광원과 물체의 분광분포를 사용하여 물리적 특성을 고려하는 알고리즘을 구현하였다.

사실감 있는 영상을 생성하기 위한 음영모델에 있어서는 지금까지 많은 모델들이 제시되어왔다. 가장 초

기 모델로서 Phong<sup>[8]</sup>은 경험과 실험에 기반한 간단한 반사모델을 제안하였지만, 간단한 수식으로 현실감 있는 영상을 생성한다는 장점은 있지만, 물체들의 다양한 물리적인 현상을 반영하지는 못했다. Blinn과 Cook은 음영모델에 있어서 물리적 기반으로 접근하여 실제에 일어나는 물리적 현상을 반영하였지만, 특정 물체에 한정적으로 적용되었다. 본 논문에서는 물리적 현상을 고려하기 위해 광원과 물체의 분광분포특성을 이용하여 색을 추정하는 알고리즘을 제안하였으며, 빛을 투과시키는 물체에 대해서는 빛에너지를 흡수하는 성질을 있으므로, 흡수되는 양을 Bouguer-Beer의 법칙<sup>[5]</sup>을 적용하여 정량화함으로써 더욱 실사 영상에 근접한 3차원 영상을 재현하였다. 또한, 상수로서 주변광을 정의하던 기존의 음영모델을 개선하여 주위 물체들의 확산반사의 인자를 고려한 새로운 주변광을 정의함으로써 개선된 음영모델을 제안하였다.

## II. 광선추적기법(ray tracing method)

### 1. 순방향 광선추적기법(forward ray tracing)

빛의 순방향 추적은 광원에서 시작된 광선이 물체에 닿아 반사, 산란, 투과되는 현상을 모델링하여 최종적으로 관찰자의 눈에 들어오는 빛을 찾는 기법으로 너무 많은 샘플과 계산량 때문에 응용하기에 어려움이 있다. 순방향 광선추적기법은 역방향 광선추적기법에 비해 자연현상을 좀 더 충실하게 시뮬레이션한다는 점에서 장점이라 할 수 있지만, 광원이 내보내는 모든 방향의 광선을 추적해야 한다는 비능률적인 단점을 가지고 있다. 즉, 광원에서 시작하여 수많은 방향으로 세분화시킨 광선들을 모두 추적한다 해도, 그것들 중 대부분은 우리의 눈에 들어오지 않을 뿐만 아니라 그러한 광선들은 영상을 생성할 때에 전혀 기여하지 못하기 때문이다. 그러므로 충분한 개수의 광선이 눈, 즉 화면에 들어오도록 만들기 위해서는 광원에서 출발한 광선들을 거의 무한하게 세분화시켜야 하므로 사실상 이러한 방법으로 자연현상을 모델링 하기란 불가능하다.

### 2. 역방향 광선추적기법(backward ray tracing)

순방향 광선추적기법에 비하여, Arbo<sup>[6]</sup>와 Whitted<sup>[7]</sup>에 의해 제안된 역방향 추적기법은 관찰시점이 되는 인간의 눈에서 시공간(viewing space)이 되는 스크린

으로 이어지는 광선(ray)의 경로를 하나하나 추적하여 눈에 들어오는 빛만을 찾아내는 방법이다. 즉, 관찰자의 시선방향을 따라가서 빛을 발산하는 물체를 찾아내는 역방향 추적기법으로써, 미리 정해진 개수만큼의 광선을 추적하므로 모든 광선을 추적하는 정방향 추적기법에 비해 계산량을 줄일 수 있는 효율적인 방법이다. 추적 대상이 되는 시선이 물체에 닿았다는 것은 그 방향에서 물체의 빛이 눈으로 들어오는 것을 의미하므로 추적하는 모든 광선은 영상내의 픽셀의 색을 결정하는데 모두 기여하게 된다. 이러한 역방향 광선추적기법은 기존의 와이어프레임 렌더링이나 은면제거 알고리즘(hidden surface removal)이 필요하지 않고, 경면반사(specular reflection)나 경면굴절(specular refraction)이 일어나는 금속이나 거울, 또는 유리물체에 대한 매우 사실적인 영상을 생성할 수 있다는 장점이 있다. 그림 1에서 이와 같은 역방향광선추적기법의 개념을 나타내고 있다.

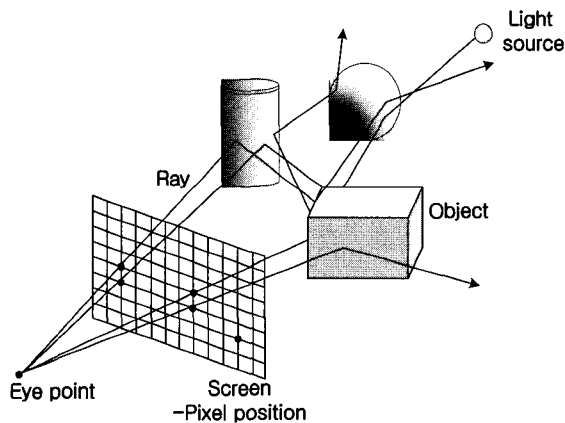


그림 1. 역방향 광선추적기법의 개념도  
Fig. 1. The concept of backward ray tracing

그림 1에서 볼 수 있듯이, 시점(eye point)을 출발한 광선은 컴퓨터의 스크린으로 설정되는 시공간을 따라 픽셀단위로 진행하면서 물체와의 교차점을 찾고, 다음 진행방향을 계산하면서 광원으로부터 오는 빛을 강도를 계산하는 과정을 반복한다. 만약 시점을 출발한 임의의 광선이 어떠한 물체와도 교차점이 존재하지 않으면, 그 픽셀은 미리 정한 배경색으로 칠해지게 된다. 본 논문에서는 이러한 역방향 광선추적기법을 사용하여 시감을 통해 느끼는 임의의 3차원 장면을 2차원 실사영상으로 정확하게 재현하기 위한 모델링 알고리즘을 제안하였다.

### III. 광선추적기법을 이용한 렌더링

광선추적기법을 이용하여 3차원 영상을 생성하기 위해서는 먼저, 광선과 물체, 그리고 스크린을 가상의 공간상에 설정한다. 각 픽셀 단위로 광선을 생성하여 가상공간의 물체와 교차점을 계산하고, 음영모델을 사용하여 색의 기여도를 계산하는 일련의 과정을 반복 수행한다. 그림 2에서 이러한 역방향 광선추적기법의 흐름도를 나타내었다.

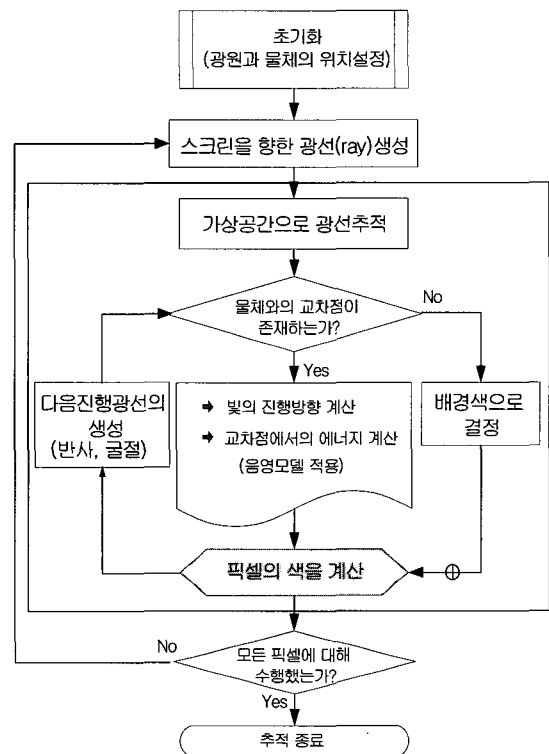


그림 2. 역방향 광선추적기법의 흐름도  
Fig. 2. The flowchart of backward ray tracing

#### 1. 광원과 물체의 설정

광선추적기법에서는 시선을 추적하므로, 모든 물체는 3차원의 실좌표계(world coordinate)로 표시되는 가상의 공간상에서 설정되고, 이후의 모든 계산은 3차원 벡터에 의해 이루어진다. 렌더링을 위해 사용될 수 있는 물체(object)로는 구(sphere), 원기둥(cylinder), 그리고 원뿔(cone)과 같이 기본적인(primitive) 형태를 가진 도형과 삼각메쉬(triangle mesh)로 표현되는 복잡한 곡면과 형태를 가진 물체로 설정될 수 있다. 픽셀의 색을 결정하는데 결정적인 영향을 끼치는 광원은 가장 간단한 형태로 점광원이 사용될 수 있으며, 좀 더 실

제적인 렌더링을 위해서 구(sphere) 형태나 좀더 복잡한 모양의 메쉬구조로 설정될 수 있다. 따라서, 광선추적기법에서 시선(ray)은 직선의 방정식으로 나타내고, 그 시선을 추적한다는 것은 직선과 물체와의 교점을 계산한다는 것이며, 여러 물체와의 교점 중에서 가장 가까운 교점을 시선이 도달한 곳으로 결정하게 된다. 진행하는 광선과 물체간의 교점을 계산하기 위해서 가상의 3차원 공간에 위치하고 있는 모든 물체는 3차원 방정식으로 표현되어야 한다. 따라서, 많은 메쉬로 구성된 곡면물체에 대해서는 각 메쉬를 하나의 물체로 가정하고 각각의 평면의 방정식을 통해서 교점을 계산할 수 있게 된다. 그림 3에서와 같이 시점(eye point)에서 출발하는 시선을 설정하는 원리는 원근투영에서와 마찬가지로 시점과 물체 사이에 화면을 놓고 화소와 시선을 대응시키는 것이다. 눈에서 출발한 시선을 따라가다가 물체를 만나게 되면 시선을 반사시켜 방향을 바꾸어준 뒤, 새롭게 생성된 시선과 다른 물체와의 교차점을 찾는 일을 계속해서 반복하게 된다.

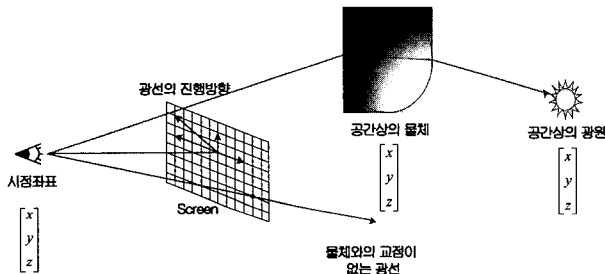


그림 3. 3차원 공간에서의 광원과 물체의 설정  
 Fig. 3. The setting of light sources and objects in three dimensional space

2. 광선과 물체의 교차점 계산

가상의 3차원 공간상에 물체가 위치하고 시점에서 스크린을 통한 광선이 생성되면, 진행하고 있는 광선이 어떤 물체와 교차하고 있는가를 먼저 결정하게 된다. 직선의 방정식을 가지는 광선과 3차원 방정식으로 표현되는 물체 사이의 교차점을 계산하기 위해서 두 개의 방정식을 연립하여 해를 구하는 대수적인 방법(algebraic solution)이 사용된다. 본 논문의 실험에서는 3차원 공간상의 물체로서 간단한 식으로 나타낼 수 있는 구와 삼각 메쉬(triangle mesh)로 이루어진 곡면물체를 사용하였다.

3. 반사와 굴절의 광학적 모델

광선의 진행방향에서 광선과 물체의 교차점이 발생하면, 물체의 성질에 따라 반사와 굴절이 일어난다. 광선추적기법에서는 이러한 반사와 굴절을 반복하면서 시점에 도달하는 최종적인 광선의 색을 만들어 간다. 다음 두 식은 각각 입사광  $V$  에 대한 반사광  $R$ 과 굴절광  $T$ 의 계산식을 나타낸다.

$$R = V - 2(V \cdot N)N \tag{1}$$

$$T = V - N[V \cdot N + \sqrt{((n_2/n_1)^2 - 1)|N|^2 + (V \cdot N)^2}] \tag{2}$$

여기서  $N$ 은 길이가 1인 표면의 법선벡터이고,  $n_1$ 과  $n_2$ 는 각 매질의 굴절율을 나타낸다. 교차점에서 반사와 굴절방향을 계산할 경우, 법선벡터의 방향은 물체의 외부를 향하도록 계산하는 것을 원칙으로 한다. 즉, 법선벡터는 빛이 들어오고 있는 방향을 향하고 있어야 한다. 빛이 반사하는 물체를 만난 경우에는 물체의 외부를 향하는 법선벡터를 그대로 사용할 수 있지만, 투명한 물체 내부를 통과한 빛이 물체 외부로 다시 나가는 것을 계산할 경우에는 법선벡터의 방향을 반대로 바꾸어 주어야만 한다. 광선추적기법에서 한 개의 광선을 추적하는 횟수는 무한정 크게 할 수 없으므로, 일정한 한계에서 추적을 멈추게 해야 하고 알고리즘의 계산적인 효율성을 고려하여 적용대상에 따라 미리 정해주어야 한다. 본 논문의 시뮬레이션에서는 20회의 반사와 굴절로 제한하여 적용하였다.

IV. 기존의 음영모델

광선추적기법에서는 진행하던 빛이 가상의 3차원 공간상에 있는 물체에 닿아서 교점이 발생했을 때 음영 모델을 적용하여 그 지점에서의 색을 계산하게 된다. 거울면과 같이 입사하는 빛을 모두 정확하게 반사하는 이상적인 정반사(specular reflection)를 제외하고는 대부분의 실세계 물체들은 정반사 방향을 중심으로 멀어질수록 빛의 세기가 점점 약해지다가 결국 자연스런 난반사되는 빛의 세기로 바뀌게 된다. 일반적으로 물체에 부딪힌 빛에 대해서 난반사를 고려해야 하지만 난반사로 발생한 모든 광선을 추적하기란 불가능하므로 난반사를 고려하지 않고 경면반사와 경면투과의 광

선만을 고려하여 추적하게 된다. 따라서 광원, 표면, 그리고 시점간의 관계를 고려해서 난반사 및 정반사되는 빛의 세기를 계산하면 물체 표면의 색상이 구해진다. 단, 대부분의 음영모델에서는 물체의 표면 특성을 고려하기 위해 광원(light source)과 이루는 각도에 따라 확산인자(diffuse factor)를 달리 적용하여 색의 강도를 결정한다. 그림 4에서는 이러한 음영모델 적용을 위한 입사광  $V$ , 반사광  $R$ , 그리고 법선벡터  $N$  사이의 여러 각도를 나타낸다.

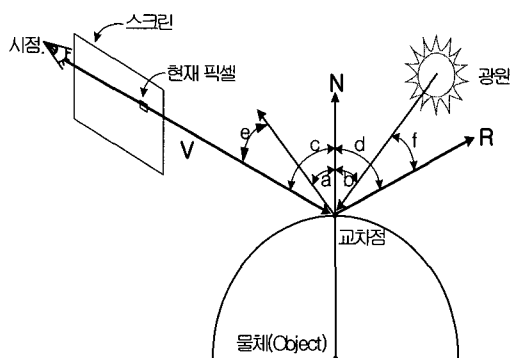


그림 4. 음영모델에 사용되는 여러 각도들  
Fig. 4. Some angles used for shading model

가장 기본적인 음영모델로서 Phong은 난반사의 계산을 위해서는 Lambert의 코사인 법칙을 이용하고 정반사의 계산을 위해서는  $\cos^2 \alpha$ 을 곱하는 방법을 이용하였다.  $\alpha$ 는 반사광의 벡터  $R$ 과 입사광의 벡터  $V$  사이의 각도이며,  $n$ 은 하이라이트의 크기를 조절하는 변수이다. 즉, 반사광과 입사광이 일치하는 지점을 최대로 해서 두 벡터 사이의 각도가 벌어질수록 정반사의 세기가 점점 줄어들도록 했다. 이 모델은 계산량이 적고 구현이 간단하며 최종적인 결과영상이 비교적 사실적이지만, 실제 표면에서 일어나는 물리적인 현상을 기초로 한 방법이 아니라 실험적이며 경험적인 접근 방법이다. 이에 반해, Blinn<sup>[9]</sup>은 Torrance와 Sparrow<sup>[10]</sup>의 기하학적인 광학특성(geometrical optics)을 이용하는 물리적 기반의 음영모델을 제안하였다. 즉, 거울과 같이 매끄러운 표면을 제외한 대부분의 물체 표면에서는 미세표면의 일정하지 않은 반사특성으로 정반사율이 높은 부분이 반사각과 일치하지 않음을 이용하여 하이라이트가 일어나는 부분을 새롭게 정의하여 수식화한 물리적 기반의 방법이다. 하지만 수식을 유도하는데 복잡한 과정을 거쳐야만 하고, 모든 표면에 대한 미세정보를 알고 있어야 한다는 단점이 있다. 또한, 금속물체

에 대한 개선된 반사모델로서 Cook<sup>[11]</sup>은 색의 이동효과(shift effect)를 적용하여 좀더 현실감 있는 영상을 생성하였다. 영상의 현실감을 좌우하는 음영모델에 있어서, 실제계에서 일어나는 물리적인 특성을 더욱 정확하게 고려하기 위하여 물체의 분광분포곡선을 계산에 이용한 Hall 음영모델<sup>[12]</sup>은 실제의 광원과 물체의 물리적 반응을 모델링하였지만, 투과모델에 대해서 물체를 통과하는 빛의 확산 특성과 에너지의 소멸현상을 모델링하지 못한 단점이 있다. 따라서 본 논문은 이러한 분광분포 기반의 음영모델과 투과체에 대한 에너지의 흡수현상을 광선추적기법에 적용하여 구현하였고, 실사영상에 근접한 3차원 영상을 생성하기 위해 디스플레이 장치의 특성을 고려한 재현알고리즘을 제안하였다.

## V. 분광분포 기반의 광선추적기법

### 1. 분광분포 기반의 에너지 계산

실제로 눈의 시각으로 느끼는 색을 정확하게 추정하기 위해서는 그 색의 물리적인 변화과정을 추적할 필요가 있는데, 그 이유는 눈으로 들어오는 빛에너지는 광원에서 출발하여 여러 물체들을 반사, 투과하는 과정을 거치게 되고 주변광(ambient light)의 영향을 받아 에너지의 크기와 분광분포(spectral distribution)가 변화하기 때문이다. 모든 물체는 고유의 색을 나타내는 분광특성을 가지고 있고, 분광반사특성 또는 분광투과특성이 그 물체의 물리적 성질을 가장 잘 표현한다. 따라서, 임의의 물체에 반사되어 도달한 빛의 에너지 분포는 물체에 부딪히기 전의 광원의 분광분포와 물체의 고유특성인 분광반사도(spectral reflectance)의 곱연산에 의해서 만들어진다<sup>[6]</sup>. 따라서 실사영상을 생성하기 위한 렌더링 기술에는 더욱 실제감 있는 영상을 만들기 위해 광원과 물체의 분광분포가 정확히 모델링되어야 한다. Cook은 구리빛 화병(copper vase)이나 고무와 같은 실제의 특정 재료의 렌더링을 위해 그 재료의 분광반사도를 사용하였고, Hall의 음영모델에는 물체의 경면반사(specular reflection)와 확산반사(diffuse reflection), 그리고 투과특성을 파장의 함수로 나타나 있다. 본 논문에서는 광원과 물체의 물리적인 성질을 고려하기 위해서, 조명(illumination), 반사(reflection), 그리고 투과(transmission)와 같은 광학적 현상을 각 모델의 분광분포특성에 기반하여 계산하였

다. 실사영상을 재현하기 위해 본 논문에서 사용된 광선추적기법은 시선에서 출발한 광선이 물체와 교차하여 반사와 굴절을 반복할 때에 기존의 RGB 삼원색으로 계산하지 않고 색의 분광분포를 이용한 계산을 함으로써 실세계에서 일어나는 물리적 현상을 정확하게 모델링하였다. 그림 5에서는 이러한 과정을 나타내었다. 광원에서 출발한 빛에너지의 분광분포는 투과체를 통과하면서 분광분포가 변형되고, 반사하는 물체를 만나면 또다시 분광분포가 변화하여 최종적으로 사람의 눈에 입사하는 빛에너지는 사람이 인식할 수 있는 물체의 색으로 나타내어진다.

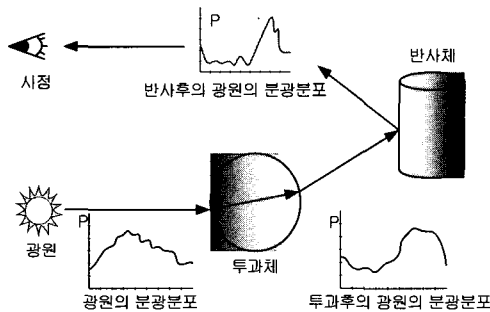


그림 5. 광원과 물체의 분광분포에 기반한 색의 계산  
Fig. 5. Calculation of the color based on spectral distribution of light sources and objects

2. 재현모니터의 특성을 고려한 색의 계산

모든 색은 각각 고유의 분광분포를 가지고 있고, 분광분포에 대한 정보로서 장치 독립적인(device independent) 색 공간으로 변환하여 정확한 색의 정의가 가능하게 된다. 또한, 이러한 물체의 고유색을 디스플레이 장치에 정확히 재현하기 위해서는 현재의 장치에 맞는 변환행렬을 통해 RGB 값으로 변환하는 과정을 거쳐야 한다. 본 논문에서는 최종적인 픽셀의 색을 계산하기 위하여 이러한 디스플레이 장치의 특성을 고려하였다. 따라서, 광원에서 출발한 빛에너지의 분광분포가 반사와 투과를 반복하면서 물체의 반사와 투과특성에 따라 변형의 과정을 거쳐서 최종적으로 눈에 도달하는 빛에너지  $R_\lambda$ 는 다음 식을 통해 물체의 고유색을 대표하는 XYZ 삼자극치로 변환된다.

$$\begin{aligned} X &= k \sum_{\lambda} S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} \Delta\lambda \\ Y &= k \sum_{\lambda} S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

$$Z = k \sum_{\lambda} S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} \Delta\lambda$$

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} S_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta\lambda}$$

여기서  $k$ 는 정규화상수(normalizing constant)이고,  $\bar{x}_{\lambda}, \bar{y}_{\lambda}$ , 그리고  $\bar{z}_{\lambda}$ 은 CIE 표준등색함수(color matching function)이며<sup>[5]</sup>,  $S_{\lambda}$ 는 광원의 분광분포이다. 스크린에 표현되는 최종적인 색은 디스플레이 변환행렬  $M$ 을 통해 XYZ 삼자극치에서 현재의 디스플레이 모니터에서 재현할 RGB 값으로 최종 변환하여 나타낸다. 본 논문의 실험에서는 모니터 색온도 9300K의 표준변환행렬을 사용하여 RGB값을 표현하였다. 다음 식에서 이러한 변환식을 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.5182 & -1.4991 & -0.5181 \\ -0.8962 & 1.7525 & 0.0437 \\ 0.0798 & -0.2437 & 0.8931 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (4)$$

VI. 제안한 물리적 기반의 음영모델

본 논문에서 제안한 물리적 기반의 음영모델은 투과체를 통과할 때 발생하는 빛에너지의 흡수인자를 이론적 근거를 기반으로 추가하고, 주위물체들의 난반사를 고려하여 주변광을 정의한 새로운 모델을 제안하였다.

1. Bouguer-Beer의 법칙을 이용한 에너지 흡수인자

광선이 빛을 투과하는 물체를 통과할 때, 투과한 후의 분광분포는 광선의 분광분포와 투과체의 분광투과도 사이의 곱으로 계산되어진다. 그러나, 직진하던 광선이 특성이 다른 매질을 통과할 때에는 굴절이 일어나는 동시에 빛에너지도 감소를 하게 되는데, 매질의 두께가 커질수록 그 감소량은 커지게 된다. 마치 수면을 통과하여 입사한 빛이 깊은 바다 속으로 들어갈수록 약해져서 나중에는 아주 소멸해 버리는 현상과 동일하다. 투명한 물체가 빛에너지를 흡수하는 정도는 외부에서 그 물체를 통해 느끼는 색에도 영향을 끼치는데, 예를 들어서 만일 물체가 빛을 완전히 흡수한다면 그 물체는 검은색으로 보여질 것이다. 임의의 투명한 물체에 대해서 그 흡수 성질은 파장의 함수로 표현이 가능하며, 그 물체의 색을 추정하는데 이용될 수 있다. 본 논문에서는 이러한 물리적 현상을 광선추적

기법에 적용하기 위해 Bouguer-Beer의 법칙을 적용하여 진행하는 빛에너지의 감소현상을 두께와 분광투과도의 관계로 모델링 하였다. Bouguer는 특정 물체의 분광투과도와 두께 사이에는 다음 식에서와 같이 지수 관계가 성립한다는 것을 실험을 통해 증명하였다<sup>[5]</sup>.

$$T_{\lambda,i} = t_{\lambda}^b \tag{5}$$

여기서  $T_{\lambda,i}$ 와  $T_{\lambda}$ 는 각각 물체 내부의 분광투과율과 단위두께 당 분광투과율을 나타내고  $b$ 는 물체의 두께를 나타낸다. 한 예로, 단위두께 1mm당 분광투과율이 0.9이고, 두께가 3mm인 물체를 통과할 때 전체의 흡수 효과는  $t_{\lambda}^b = 0.9^3 = 0.729$  가 되어서 약 72.9%의 에너지가 그 물체를 통과하게 된다. 그림 6에서는 물체의 두께에 대한 투과하는 빛에너지의 감소량을 도식적으로 나타내고 있다. 광선추적기법에서는 진행하던 빛이 가상의 3차원 공간상에 있는 물체에 닿아서 교점이 발생했을 때 그 지점에서의 빛에너지를 계산하게 된다. 일반적으로 물체에 부딪힌 빛에 대해서 난반사를 고려해야 하지만 난반사로 발생한 모든 광선(ray)을 추적하기란 불가능하므로 본 논문에서는 난반사를 고려하지 않고 경면반사와 경면투과의 특성만을 고려하여 실험하였다.

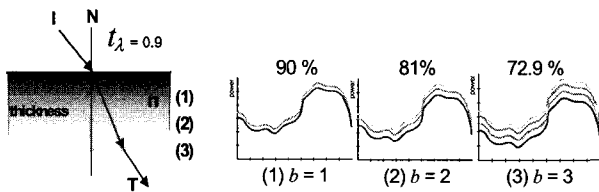


그림 6. 물체두께에 대한 투과에너지의 감소  
Fig. 6. A reduction in energy of transmitted light according to the thickness of object

Hall의 분광분포에 기반한 음영모델에서 경면투과와 반사에 대한 각각의 공식이 다음 두 식에 나타나 있다.

$$I(\lambda) = k_{st} \times I_i(\lambda) \times F_{st}(\lambda) \times (L \cdot N)^{n'} + k_{sr} \times I_a(\lambda) \times F_{sr}(\lambda) \tag{6}$$

$$I(\lambda) = k_{sr} \times I_i(\lambda) \times F_{sr}(\lambda) \times (L \cdot N)^{n'} + k_{st} \times I_a(\lambda) \times F_{st}(\lambda) \tag{7}$$

여기서  $I(\lambda)$ 와  $I_a(\lambda)$ 는 각각 교점 표면과 주변광의 빛에너지 분광분포를 나타내고,  $k_{st}$ 와  $k_{sr}$ 는 각각 경면 투과계수와 반사계수를 나타낸다.  $I_i(\lambda)$ 는 광원의

분광분포,  $F_{st}(\lambda)$ 와  $F_{sr}(\lambda)$ 는 각각 물체표면의 경면 분광투과분포와 경면 분광반사분포를 나타내고,  $(L \cdot N)$ 는 광원과 법선의 내적, 그리고  $n'$ 는 표면의 하이라이트 계수를 나타내고 있다. 본 논문에서 제안한 Bouguer-Beer의 감소인자의 요소를 추가하는 것으로 경면투과에 대한 음영모델을 다음 식과 같이 수정하여 투과하는 물체에 대해 광선을 추적할 때 흡수되어 감소하는 빛에너지를 고려하였다.

$$I(\lambda) = k_{st} \times I_i(\lambda) \times (F_{st}(\lambda) \times t_{\lambda}^b) \times ((L \cdot N)^{n'}) + k_{sr} \times I_a(\lambda) \times F_{sr}(\lambda) \tag{8}$$

## 2. 물체들의 확산반사율을 고려한 주변광 계산

지금까지 제안되었던 많은 음영모델에서는 주변광(ambient light)을 설정할 때 주변의 물리적 현상을 고려하지 않고 일률적으로 동일하게 정의하였다. 식 8에서 볼 수 있듯이 주변광 인자  $k_{sr} I_a(\lambda)$ ,  $F_{sr}(\lambda)$ 에서 주변광을 나타내는  $I_a(\lambda)$ 는 재현하고자 하는 영상에 따라 전체적인 밝기만을 조절하는 역할을 할 뿐, 이에 대한 연구는 미흡한 채로 남아있다. 본 논문에서는 이러한 주변광에 대한 새로운 정의를 제안한다. 즉, 주변의 물체들의 확산반사(diffuse reflectance)의 비율을 정량적으로 주변광의 설정에 기여하도록 하여 실제계의 물리적인 현상을 랜더링시 더욱 반영하도록 하였다. 따라서 본 논문에서는 다음 식에 의해서 전체적인 주변광을 나타내었다.

$$I_a(\lambda) = K_a \sum_i k_i R_i(\lambda)^{n'} \tag{9}$$

여기서  $R_i(\lambda)$ 는  $i$ 번째 물체의 분광반사분포를 의미하고,  $n'$ 는  $i$ 번째 물체의 확산인자를 나타내며,  $k_i$ 는  $i$ 번째 물체의 반사계수를 나타낸다. 즉, 영상에서 전체의 주변광을 정의하기 위해서는 물체들의 확산반사의 비율을 정량적으로 더하여서 확산반사의 비율과 반사계수가 높은 물체의 색의 주변광에 대한 기여도를 높게 하였다.  $K_a$ 는 전체 주변광의 크기를 나타내는 계수이다. 주변광의 개념적 제약조건으로, 가상의 공간에서의 주변광은 모든 음영모델의 계산에서 동일하게 적용되어야 한다는 것이다. 따라서 주변광을 계산할 때에는 정의된 모든 물체의 기여도를 계산한다. 그림 7에서 이와 같은 주변광의 기여도를 계산하는 원리를

나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 본 논문에서는 확산반사의 비율이 큰 물체일수록 주변광을 형성하는데 더 큰 기여도를 가지도록 하였다.

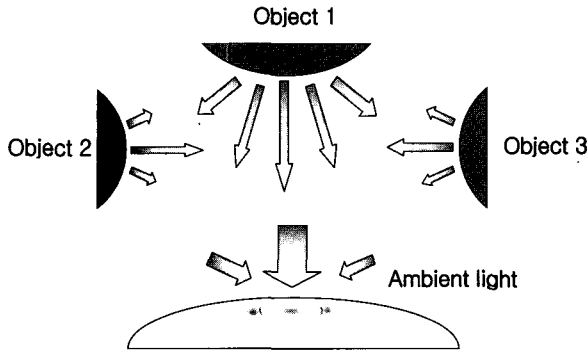


그림 7. 물체들의 주변광에 대한 색 기여도 계산  
Fig. 7. The concept of calculation of color contribution according to the ambient objects

3. 물리적 기반의 개선된 Hall 음영모델

Hall의 음영모델에서는 투과하는 물체에 대해 빛에너지를 흡수하는 인자를 고려하지 않았고, 주변광을 설정할 때에 물체들의 확산반사특성을 고려하지 않았다. 본 논문에서는, 어떤 매질을 투과하는 빛에너지가 통과하는 매질의 흡수성질로 인하여 그 강도가 점점 약해지는 현상을 음영모델에 적용하였고, 주변광의 임의로 설정하지 않고 주위 물체들의 난반사율을 고려하여 주변광에 대한 기여도를 달리하는 설정방법을 제안하였다. 다음의 두 식에서 개선된 Hall 음영모델을 나타내었다.

$$I(\lambda) = k_{sr} \times I_i(\lambda) \times (F_{sr}(\lambda) \times t^b) \times ((L \cdot N)^n) + k_a \sum_i k_i F_i^{i_{sr}}(\lambda)^n \quad (10)$$

$$I(\lambda) = k_{sr} \times I_i(\lambda) \times F_{sr}(\lambda) \times ((L \cdot N)^n) + k_a \sum_i k_i F_i^{i_{sr}}(\lambda)^n \quad (11)$$

VII. 실험 및 고찰

본 논문에서 제안한 분광분포 기반의 역방향 광선추적기법을 이용하여 임의의 플라스틱투명체의 실사영상을 재현하는 시뮬레이션 실험을 하였다. 가상의 공간상에 위치한 물체는 프로그램의 수행속도를 고려하여 복잡한 형태를 가지는 메쉬구조의 물체 대신에 5개의 간단한 구(sphere) 모델로 설정하였다. 가운데

큰 구를 중심으로 그 후면의 네 모서리에 네 개의 작은 구를 설정하여 모든 구 물체가 빛을 투과하는 투명체가 되도록 지정하였다. 광원의 설정은 중심에서 모든 물체보다 거리가 먼 곳에 점광원(point light source)으로 설정하였으며, RGB 기반의 모델에서는 RGB(1, 1, 1)의 값으로 설정하였고, 분광분포 기반의 모델에서는 D65 표준광원으로 설정하였다. 시뮬레이션의 진행은 동일한 환경에서 기존의 RGB 기반의 음영모델을 사용한 영상과 제안한 분광분포 기반의 음영모델을 사용하여 각각 그 결과를 관찰하였다. 본 논문에서는 RGB 기반의 방법과 분광분포 기반의 방법을 비교하기 위하여 가상의 물체의 각 RGB에 대응하는 분광분포를 설정하여 실험에 적용하였다. 시뮬레이션을 수행한 컴퓨터는 펜티엄 III의 900MHz이며, 영상의 해상도는 640 X 480 으로 설정하였다. 다음의 표에서는 시뮬레이션 수행시 설정한 모든 환경변수를 나타내고 있다.

표 1. 시뮬레이션에 사용된 환경변수들  
Table 1. The parameters used for simulating

환경변수	분광분포 기반의 방법		RGB 기반의방법
	D65	High light	
분광투과율	0.9	0.9	0.9
분광반사율	0.1	0.1	0.1
확산인자	20	20	20
굴절율	1.3	1.3	1.3
Bougeur-Beer의 흡수인자	95% (단위두께)	95% (단위두께)	-

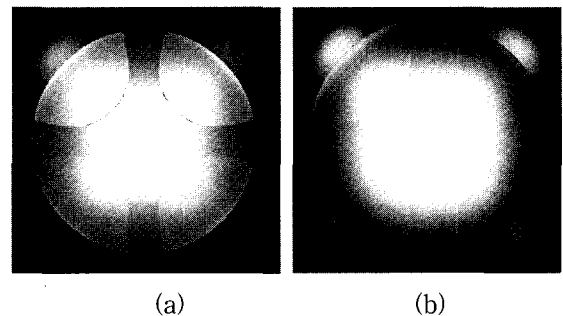


그림 8. 광선추적을 적용한 결과영상 (a) RGB 기반의 렌더링 결과영상 (b) 분광분포 기반의 렌더링 결과영상



Fig. 8. The result image with ray tracing method (a) The result image based on RGB (b) The result image based on spectral distribution

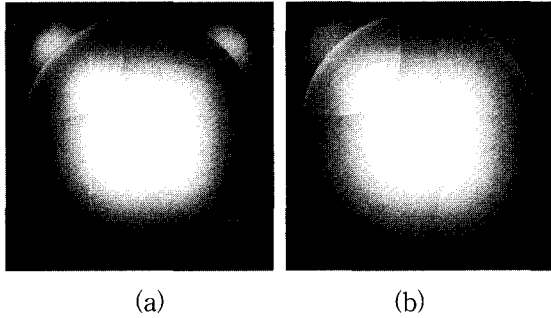


그림 9. Bougeur-Beer의 흡수인자를 적용한 결과영상 (a) 흡수인자를 적용하지 않은 결과영상 (b) 흡수인자를 적용한 결과영상

Fig. 9. The result images applied Bougeur-Beer's absorption factor (a) The result images without absorption factor (b) The result images with absorption factor

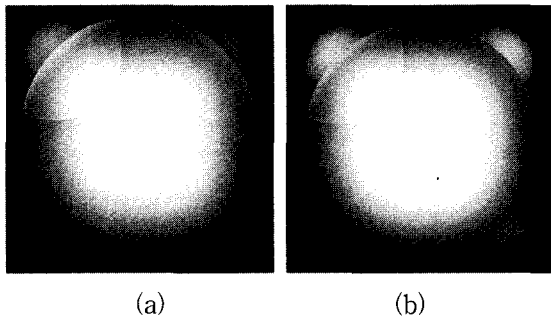


그림 10. 제안한 주위물체의 확산인자를 적용한 결과영상 (a) 10% 주변광을 적용한 결과영상 (b) 확산인자를 주변광의 인자로 적용한 결과영상

Fig. 10. The result images applying diffuse factor of ambient objects (a) The result image applying 10% ambient light (b) The result image applying diffuse factor

그림 8에서는 5개의 가상의 구에 대해 RGB 기반의 기존의 광선추적기법을 사용한 결과와 분광분포 기반의 광선추적기법을 사용한 시뮬레이션의 결과를 보여주고 있다. 결과영상에서 보듯이, 실제의 플라스틱 재질의 분광분포와 굴절률, 그리고 사용된 광원의 특성을 고려할 때, 분광분포 기반의 결과영상은 RGB 기반의 결과영상에 비해 시각적으로 실제와 유사함을 알 수 있다. 그림 8.(a)의 RGB기반의 결과영상에는 실제 태양광의 투과효과를 나타내지 못하는 반면, 그림

8.(b)에서는 실제 세계에서 볼 수 있는 직사광선의 효과를 잘 나타내고 있다. 그림 9에서는 Bougeur-Beer의 흡수인자를 적용하였을 때의 결과영상을 나타낸다. 그림 9.(b)에서 실제 물체의 색에서 빛에너지를 흡수한 후 전체적인 색의 감소가 발생한 것을 볼 수 있었다. 그림 10에서는 본 논문에서 제안한 주위물체의 확산인자를 주변광을 생성하는 기여도로 사용한 결과영상이다. 그림 10.(b)에서 각 물체의 확산인자  $n'$  를 5로 설정하여 주변광의 비율을 높게 설정하여 비교적 밝은 영상을 생성하였다.

본 논문의 또 다른 실험으로 제안한 분광분포기반의 광선추적기법을 메쉬구조의 복잡한 물체의 광선추적에도 적용할 수 있도록 일반화하여 구현하였다. 그림 11에서는 메쉬구조로 만들어진 배경이 설정된 다양한 형태의 3차원 영상을 보여주고 있으며, 광원으로는 백색의 하이라이트를 사용하였다.

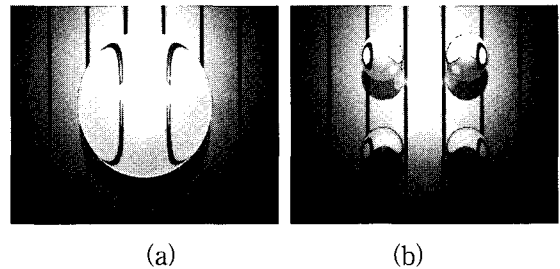


그림 11. 제안한 알고리즘을 적용한 결과영상들 (a) 한 개의 구와 배경 (b) 4개의 작은 구와 배경

Fig. 11. The result images applying the proposed algorithm (a) A sphere and background (b) Four small spheres and background

### VIII. 결 론

본 논문에서는 사실적인 영상(realistic image)을 재현하기 위해서 물체의 물리적 특성인 분광분포와 빛에너지의 흡수현상을 고려하였다. 제안한 분광분포 기반의 광선추적기법은 기존의 단순한 RGB 기반의 렌더링 방법이 아닌 광원과 물체의 실제적인 분광분포를 고려한 물리적 기반에서 모델링 하였으므로, 시제품의 개발에 앞선 가상의 모델실험을 위한 실사영상의 재현 분야에 응용할 수 있는 모델링 알고리즘이다. RGB 기반의 광선추적기법을 이용한 렌더링에서는 실제 세계에서 일어나는 광학적 현상을 모두 고려할 수 없지만, 본 논문에서 제안한 분광분포 기반의 방법에서는 실제 세계의 모든 광원과 물체를 분광분포 특성뿐만 아니라, 에

너지의 흡수성질까지 정확하게 모델링하여 더욱 정확한 실사영상을 재현하는데 적용할 수 있다. 또한 주변 광을 주위물체들의 반사성질을 고려하여 결정하는 새로운 방법을 제안하여 실제세계에서 일어날 수 있는 주위환경의 영향을 좀 더 효과적으로 나타낼 수 있는 개선된 음영모델을 제안하였다. 앞으로 물리적 특성에 기반한 좀 더 정확한 음영모델의 연구와 렌더링에 소요되는 시간을 줄이는 방법에 대한 연구가 계속 진행되어야 할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- [1] Thomas A. Funkhouser, "A Visibility Algorithm for Hybrid Geometry- and Image-based Modeling and Rendering," *Computers & Graphics*, vol. 23, pp. 719 - 728, 1999.
- [2] Tein-tsin Wong, Pheng-ann heng, Siu-Hang, and Wai-yin, "Illumination of Image-Based Objects," *The Journal of Visualization and Computer Animation*, vol. 9, pp. 113 - 127, April. 1998.
- [3] Stephen R. Marschner, Stephen H. Westin, Eric P. F. Lafortune, and Kenneth E. Torrance, "Image-based Bidirectional Reflectance Distribution Function Measurement," *Applied Optics*, 2000 Optical Society of America, vol. 39, no. 16, pp. 2592 - 2600, June. 2000.
- [4] Andrew Woo, Pierre Poulin, and Alain Fournier, "A Survey of Shadow Algorithms," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 10, no. 6, pp. 13 - 32, Nov. 1990.
- [5] Roy S. Berns, *Principles of Color Technology*, Wiley Interscience.
- [6] J. Arvo, "Backward Ray Tracing," *Tutorial Notes on the Developments in Ray Tracing SIGGRAPH 86*, Aug. 1986.
- [7] Whitted J. T., "An Improved Illumination Model for Shaded Display," *Comm. ACM*, vol. 23, no. 6, pp. 342 - 349, June. 1980.
- [8] Phong B., "Illumination for Computer-Generated Pictures," *Comm. ACM*, vol. 18, no. 6, pp. 311 - 317, 1975.
- [9] James F. Blinn, "Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures," *Computer Graphics, Proceedings, Annual Conference Series ACM SIGGRAPH*, pp. 192 - 198.
- [10] K. Torrance and E. Sparrow, "Theory for Off-Specular Reflection from Rough Surfaces," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 57, no. 9, pp. 1105 - 1114, 1967.
- [11] Robert L. Cook, "A Reflectance Model for Computer Graphics," *Computer Graphics*, vol. 15, no. 3, Aug. 1981.
- [12] Andrew S. Glassner, "An Introduction to Ray Tracing," Morgan Kaufmann Publishers, Inc.

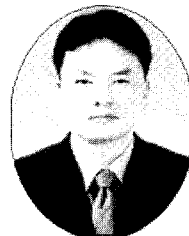
### 저 자 소 개



이 명 영(학생회원)

2000년 동명정보대학교 정보통신공학과(공학사), 2003년 경북대학교 전자공학과(공학석사), 2003년 - 현재 경북대학교 전자공학과 박사과정 재학중, <주관심분야 : 컴퓨터 그래픽,

색관리 시스템, 다중스펙트럼 영상처리 등임>



이 철 희(학생회원)

1995 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사) 1997.2 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사) 2000.8 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사) 2000.3 - 2003.8 경운대

학교 컴퓨터공학부 전임강사, 2000.8 - 현재 안동대학교 컴퓨터공학전공 조교수, 2002.6 - 현재 (사단법인)한국화상학회 총무이사, <주관심분야 : 색재현, 칼프린팅, 영상처리, 패턴인식 등임>